

熔渗法制备 C/C-Cu 复合材料的力学性能

冉丽萍¹, 周文艳¹, 赵新建², 易茂中¹, 杨琳¹

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083; 2. 厦门航空有限公司, 厦门 361006)

摘要:以碳纤维(C_f)针刺整体毡为预制体, 分别采用化学气相渗透 (Chemical vapor deposition, CVD)和浸渍炭化 (Impregnation and carbonization, I/C)制备不同密度和基体炭的 C/C 坯体; 通过添加 Ti 元素改善熔融 Cu 与 C/C 坯体的润湿性。采用真空熔渗法制备 C/C-Cu 复合材料。对复合材料的力学性能及其与坯体之间的关系进行研究, 并与常用滑板材料的力学性能进行比较。结果表明: 随着坯体密度的增加, 复合材料的抗弯强度下降, 而坯体密度为 1.4 g/cm³ 的复合材料的冲击韧性达到最大值。与用 I/C 坯体制备的复合材料相比, 用 CVD 坯体制备的复合材料具有更高的强度和韧性, 其弯曲曲线呈“假塑性”断裂特征, 断裂时纤维从热解炭层或熔渗金属相中拔出, 熔渗金属相呈“韧窝状”的塑性断裂形貌。冲击断裂时, 复合材料倾向于沿 TiC/熔渗金属界面断裂。C/C-Cu 复合材料的抗弯强度为 180~300 MPa、冲击韧性高于 3.5 J/cm², 优于常用滑动电接触材料的性能, 是一种极具潜力的新型滑动电接触材料。

关键词: C/C-Cu 复合材料; 熔渗; 力学性能; 断裂机制; 滑动电接触材料

中图分类号: TB332

文献标志码: A

Mechanical properties of C/C-Cu composites fabricated by molten infiltration method

RAN Li-ping¹, ZHOU Wen-yan¹, ZHAO Xin-jian², YI Mao-zhong¹, YANG Lin¹

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Xiamen Airlines Co., Ltd., Xiamen 361006, China)

Abstract: Using Ti addition to improve the wettability between the molten copper and C/C preforms, C/C-Cu composites were fabricated by infiltrating molten copper to C/C preforms with different densities and matrix carbon types, which were prepared by chemical vapor deposition(CVD) or resin impregnation and carbonization (I/C). The mechanical properties of the composites and the relationship between the properties and preforms were studied. The mechanical properties were compared with those of the widely used sliding electrical contact material. The results show that, with the increase of the preform density, flexural strength of the composite decreases, while the impact toughness of the composite reaches the maximum at preform density of 1.4 g/cm³. The flexural strength and impact toughness of the composite from CVD preform are higher than those from I/C preform. For the composite from CVD preform, the flexure fracture shows a lot of pull-out fibers from the matrix and the dimple morphology of typical ductile fracture in the infiltrated Cu, while the impact fracture is inclined to along the TiC/Cu(Ti) interface. The flexural strength and impact toughness of the C/C-Cu composites, which are 180–300 MPa and higher than 3.5 J/cm², respectively, are better than those of widely used C/Cu sliding electric contact material, so the C/C-Cu composite is a new competitive sliding electrical contact material.

Key words: C/C-Cu composites; infiltration; mechanical properties; fracture mechanism; sliding electric contact material

滑动导电材料既要满足强度高、电阻率小、自身
磨损小的使用要求, 又要保证对偶材料磨损小、摩擦

因数低。最典型的滑动导电材料为受电弓滑板材料。
国内外开发和使用的滑板材料主要有: 纯金属、粉末

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB600906); 湖南省重点科技支撑计划项目(2007KG2017)

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-11-29

通信作者: 易茂中, 教授, 博士; 电话: 0731-88830894; E-mail: yimaozhong@126.com

冶金、炭、浸渍金属炭和复合材料等^[1-3]。目前,在高速列车中以复合材料滑板应用较为广泛^[4]。在复合材料滑板中,金属纤维增强炭基体材料在基体损伤后导电性降低、金属纤维对导线的磨损大;短切碳纤维增强滑板中纤维分布不均匀、炭粉镀铜等制备工艺复杂;炭/炭(C/C)复合材料具有炭石墨材料自润滑性好、强度高、韧性好、可设计性好等优点^[5-6],但其电阻较大、集电性较差。因此,随着高速列车的发展,迫切需要开发新型的高性能滑板材料以满足集电容量大、摩擦磨损低、对导线磨损小的要求,从而提高受电弓系统的工作效率和使用寿命。

炭/铜(C/Cu)复合材料具有优良的导电和导热性,在无油润滑条件下具有良好的减摩和耐磨性^[5,7-8],是一种较理想的滑动电接触材料。C/Cu复合材料的制备工艺一直是研究的热点之一,目前所使用的C/Cu滑动电接触材料的生产工艺以粉末冶金法为主。但此法的成本高、两相难混合均匀、Cu与C的相溶度很小,且不发生任何化学反应,因此,C与Cu的界面结合差^[9-10],导致复合材料的组织不均匀,力学性能较差。若采用液相浸渍法将液态Cu渗入多孔C/C复合材料中,所制备C/C-Cu复合材料中的C/C和Cu各自呈连续网状结构组织,则可以充分利用C/C和Cu各自的优良性能^[9],是一种极具潜力的新型滑动电接触材料。然而,熔渗法制备C/C-Cu复合材料的关键是改善液态Cu与C/C材料之间的润湿性,改善润湿性的方法之一是向液相中添加合金元素^[10-11]。有研究表明^[12],Ti元素能有效改善熔融Cu与石墨及玻璃炭之间的润湿性,且Ti与Cu和C同时相互作用,达到改善Cu/C界面结合的目的,从而进一步改善C/C-Cu复合材料的力学性能。

本文作者以碳纤维(C_f)针刺整体毡为预制体,分别采用CVI和I/C方法制备不同基体炭和不同密度的C/C坯体,通过添加元素Ti改善熔融Cu与C/C坯体

之间的润湿性,用真空熔渗法将Cu熔融渗入多孔C/C坯体中制备C/C-Cu复合材料。研究C/C-Cu复合材料的力学性能及其与熔渗坯体之间的关系,并与常用滑板材料的力学性能进行比较,以探索熔渗制备C/C-Cu复合材料应用于滑板材料的可行性。

1 实验

以密度为0.5~0.6 g/cm³的聚丙烯腈(PAN)基碳纤维针刺整体毡为预制体,采用I/C或多次CVI及石墨化工艺制备不同密度、不同基体炭的C/C坯体,其坯体密度及基体炭类型见表1。CVI在均热式化学气相渗透炉内进行,以丙稀为碳气源,温度为800~1 000 °C;I/C采用低压浸渍,浸渍介质为呋喃树脂,浸渍压力为2 MPa,固化温度180~200 °C,炭化温度为800~1 000 °C;石墨化温度为2 300 °C。将粒度小于0.043 mm、纯度为99.8%的Cu粉和Ti粉以质量比9:1均匀混合后,与C/C坯体一同置于石墨坩锅中,用真空炭管电阻炉对装有坯体和混合粉末的石墨坩锅进行加热,分段加热至1 300 °C,并保温一段时间,将熔渗剂充分熔化并渗入多孔C/C复合材料中,制备C/C-Cu复合材料。用于性能比较的常用滑板材料是由国内某电碳厂提供的国产和进口两种主要的滑板材料。

采用Instron3369型材料试验机测试材料的抗弯强度,试样尺寸为35 mm×4 mm×3 mm,加载方式为三点弯曲,加载速度为0.05 mm/min。采用JB/6冲击试验机测试材料的冲击韧性,试样尺寸为55 mm×10 mm×10 mm。力学性能测试时,外加载荷垂直于纤维叠层平面。用RIGAKU-3014 X射线衍射仪、REICHERT MeF3A金相显微镜、带能谱(EDS)的JSM 5600LV型扫描电镜分析复合材料的组织和断口形貌。

表1 由不同类型坯体制备C/C-Cu复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of C/C-Cu composites made from different performs

Sample No.	Preform type	Matrix carbon	Preform density/(g·cm ⁻³)	Density after infiltration/(g·cm ⁻³)	Flexural strength/MPa	Impact toughness/(J·cm ⁻²)
A1	CVI	Pyrocarbon	1.1	4.05	298.6	4.01
A2	CVI	Pyrocarbon	1.3	3.78	284.7	4.67
A3	CVI	Pyrocarbon	1.4	3.78	255.8	5.32
A4	CVI	Pyrocarbon	1.5	3.78	223.7	4.36
A5	CVI	Pyrocarbon	1.6	3.78	188.1	3.73
B	I/C	Resin-carbon	1.1	3.83	200.5	3.53

2 结果与讨论

2.1 C/C-Cu 复合材料的力学性能

表 1 所列为用不同密度和不同基体炭的坯体所制备复合材料的抗弯强度和冲击韧性。从表 1 可以看出, 坯体类型和密度对材料的性能有很大影响。

2.1.1 坯体类型的影响

比较表 1 中试样 A1 和 B 的性能可以看出, 当坯体密度相同时, 用 CVI 坯体所制备复合材料的强度和韧性优于用 I/C 坯体所制备复合材料的强度和韧性。

通过加入元 Ti 素改善熔融 Cu 与 C/C 坯体之间的润湿性, 熔渗法制备的 C/C-Cu 复合材料主要由 C、熔渗 Cu 及反应形成的 TiC 相组成^[13]。熔渗 Cu 已填充原 C/C 坯体的孔隙, 而 Ti 以 TiC 分布在熔渗 Cu 与 C 相之间, 且熔渗 Cu 和 C/C 坯体互成连通网络状结构, 如图 1 所示。坯体的制备工艺不同, 熔渗后复合材料的相组成完全相同, 但由于基体炭的类型及其在复合材料中的分布不同, 因而形成的界面不同, 从而导致材料的力学性能不同。

对于基体炭为树脂炭的 I/C 增密坯体, 由于树脂炭在炭化过程中的收缩会在碳纤维之间形成微裂

纹^[14], 熔融 Cu-Ti 合金液在毛细管力的作用下渗入微裂纹, 金属液中的 Ti 易与坯体中的 C_f 反应, 造成纤维损伤, 从而导致纤维强度的下降, 因此, 不能很好地利用纤维的高强度; 同时, 金属液的渗入弱化了树脂炭与 C_f 的界面结合^[15]; 此外, I/C 增密的 C/C 坯体熔渗后复合材料的密度较低(见表 1), 即材料的致密度低, 因此, I/C 坯体熔渗制备复合材料的强度和韧性较低。而用 CVI 方法制备的 C/C 复合坯体, 在碳纤维的周围沉积了一层或多层热解炭, 对碳纤维起到了保护作用, 可以更好地利用纤维的增强作用, 因此, 用 CVI 增密坯体制备的复合材料具有更高的强度和韧性。

2.1.2 坯体密度的影响

从表 1 可以看出, 随着坯体密度的增加, 复合材料的抗弯强度逐渐下降。复合材料中熔渗金属与 C/C 相的相对比例决定 C/C-Cu 复合材料的强度, 熔渗金属的比例越高, 复合材料的强度越高。

图 2 所示为用不同密度坯体所制备复合材料的载荷—位移曲线。在加载起始阶段, 材料呈弹性应变的特点。随着变形的增加, 弯曲应力仍有一定幅度的增加, 达到最大应力后, 由于基体先发生断裂, 纤维未断裂, 因此, 应力缓慢下降, 直到纤维断裂, 表现出一定的塑性^[15]。这表明材料中纤维具有增强和增韧作用, 能避免材料发生脆性断裂, 此时, C/C-Cu 复合材料呈“假塑性”断裂的特征。值得注意的是, 随着坯体密度的增加, 最大断裂载荷下降(即抗弯强度下降)时, 其塑性(挠度)则出现了极大值, 当坯体密度为 1.4 g/cm^3 时所制备试样的挠度最大。

C/C-Cu 复合材料的冲击韧性与坯体密度的关系也出现了极大值, 如表 1 所列, 用密度为 1.4 g/cm^3 的 CVI 坯体所制备的复合材料具有最高冲击韧性, 这和

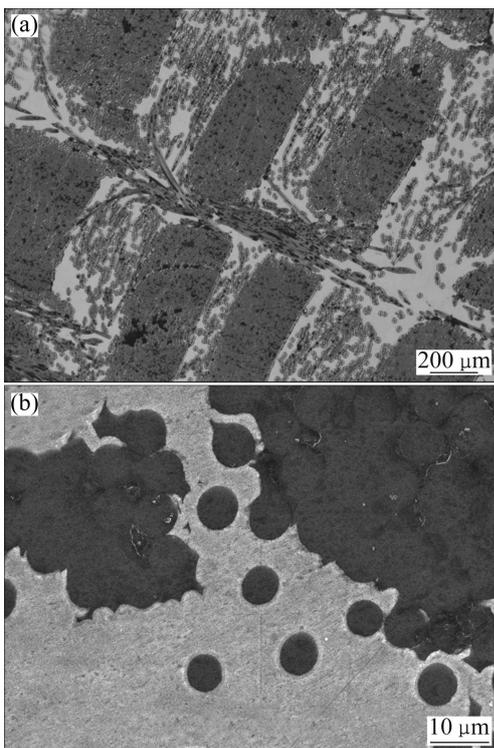


图 1 用 CVI 坯体制备复合材料的形貌

Fig.1 Morphologies of composite fabricated from CVI preform: (a) Optical image; (b) SEM image

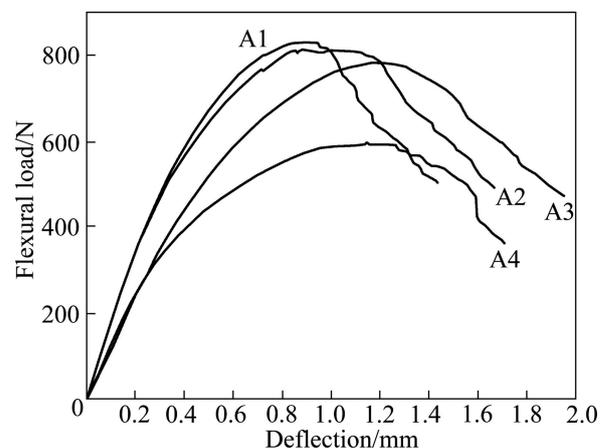


图 2 C/C-Cu 复合材料弯曲时的载荷—位移曲线

Fig.2 Curves of flexural load vs deflection for C/C-Cu composites

复合材料弯曲时的挠度(见图 2)与坯体密度的变化规律完全一致。材料冲击韧性的大小由材料的强度和塑性共同决定,从图 2 所示材料的弯曲曲线可以看出,密度为 1.4 g/cm^3 的坯体所制备复合材料的断裂应力居中,但弯曲挠度最大,此时材料断裂时所需的断裂能很大^[16],因而材料具有较好的韧性。

2.2 复合材料的断裂形貌及断裂机制

复合材料的断裂形貌与坯体类型、坯体密度及加载方式有关。图 3 所示分别为用 I/C 和 CVI 坯体制备复合材料弯曲断裂时的断口形貌。从图 3(a)可以看出, I/C 坯体制备复合材料的弯曲断口为完全裸露的纤维,基体已全部脱落,说明碳纤维与基体炭及熔渗相之间的界面结合很差,因此,碳纤维在脱粘过程中所受阻力较小,导致碳纤维拔出长度很长。碳纤维周围没有基体炭和熔渗金属相的包覆^[13],因而基体对材料性能的贡献显著减小,在弯曲断裂过程中不能有效地将载荷传递到纤维上,使纤维的作用得到充分发挥。从图 3(b) CVI 坯体制备复合材料试样的弯曲断口形貌可以看出,复合材料在断裂时有纤维从热解炭层拔出,呈现阶梯层状的断裂形貌,这与 CVI 工艺增密道次有关,由于不同增密周期的热解炭层之间存在界面,可能存在环形微裂纹,热解炭之间不形成强界面结合。当纤维从基体拔出时,容易发生平行于纤维轴方向的分层。因此,复合材料断裂时,裂纹易沿着热解炭之间界面扩展,因而形成了阶梯状断裂形貌,也说明纤维与基体的断裂不是同时进行的,因而提高了材料的强度和韧性。

因此,在 CVI 坯体制备的复合材料中,基体相在复合材料断裂过程中的作用更为显著。图 4 所示为用 CVI 坯体制备的 A1 试样的弯曲断口形貌。由图 4(a)

可以看出,试样断裂处有大量纤维拔出,两个方向纤维束断裂的部位不在同一个平面上,说明纤维是逐渐断裂的,且断裂后在断裂面上粘有较多亮白色的金属物质。在图 4(b)所示的断口形貌中还可以看到,在基体金属的断裂部位出现了典型金属塑性断裂的“韧窝状”形貌,熔渗金属相以塑性断裂方式破坏。同时,断口上熔渗相也出现了类似从热解炭层拔出的阶梯层状断裂形貌,如图 4(c)所示。熔渗金属中的 Ti 和坯体中的 C 在界面反应生成了 TiC,改善了 Cu/C 界面结构,增加了复合材料界面和裂纹扩展路径,从而提高了材料的强度。但随着坯体密度的增加,复合材料中熔渗金属相减少,弯曲断裂后典型金属塑性断裂的“韧窝状”形貌也将减少。

图 5 所示为不同坯体制备复合材料经冲击断裂后的断口形貌。由图 5 可知,断裂表面覆盖一层亮白色的化合物。由于冲击过程中材料的断裂速度很快,裂纹从材料最脆弱的界面迅速扩展而发生断裂。C/C-Cu 复合材料中存在 C_f /热解炭、热解炭/反应形成的 TiC 和 TiC/熔渗金属等界面。相比而言, TiC/熔渗金属界面结合较弱,因此,材料的断裂均发生在 TiC/熔渗金属界面。

从上面的分析可知,坯体中基体炭的类型和坯体密度对熔渗法制备 C/C-Cu 复合材料的断裂机制具有明显影响。当坯体中基体炭为树脂炭时,熔融金属的渗入弱化了树脂炭与 C_f 的界面结合,纤维易从基体中拔出,呈裸露的形貌,纤维对复合材料的增强作用下降。而当基体炭为热解炭时,其断裂形式为纤维从热解炭层拔出,同时热解炭呈阶梯层状结构包覆在纤维上,断裂时裂纹沿着界面扩展,并增加了裂纹扩展路径,纤维的增强作用得以充分发挥,纤维及热解炭层

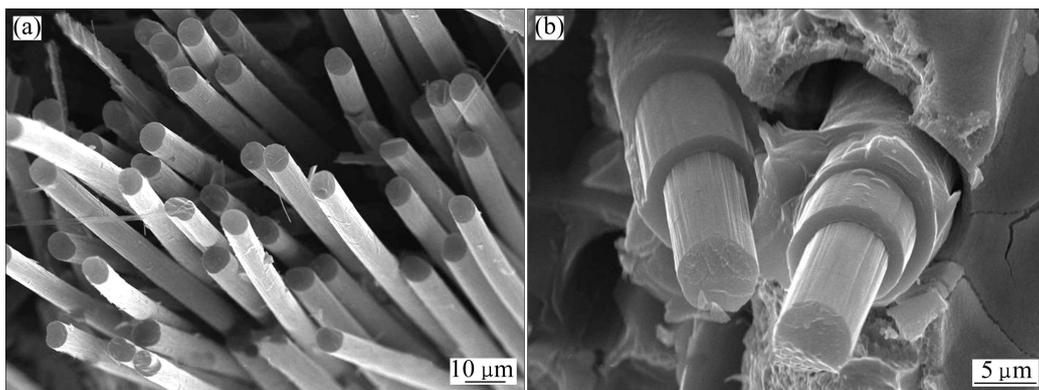


图 3 不同坯体所制备复合材料的弯曲断口形貌

Fig.3 Fractographs of composites made from different preforms: (a) Sample B from I/C preform; (b) Sample A3 from CVI perform

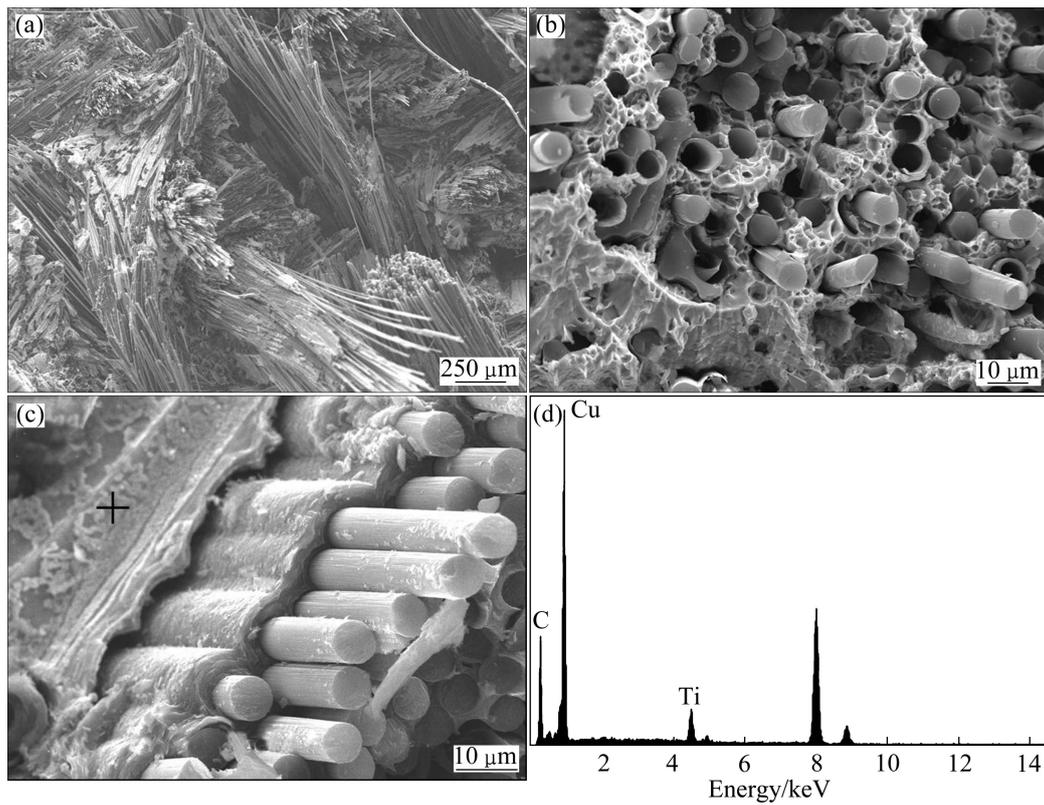


图 4 A1 试样的弯曲断口形貌

Fig.4 Fractographs of sample A1: (a) Lower magnification; (b) Higher magnification; (c) Fractograph of bright white compound; (d) EDX result in (c)

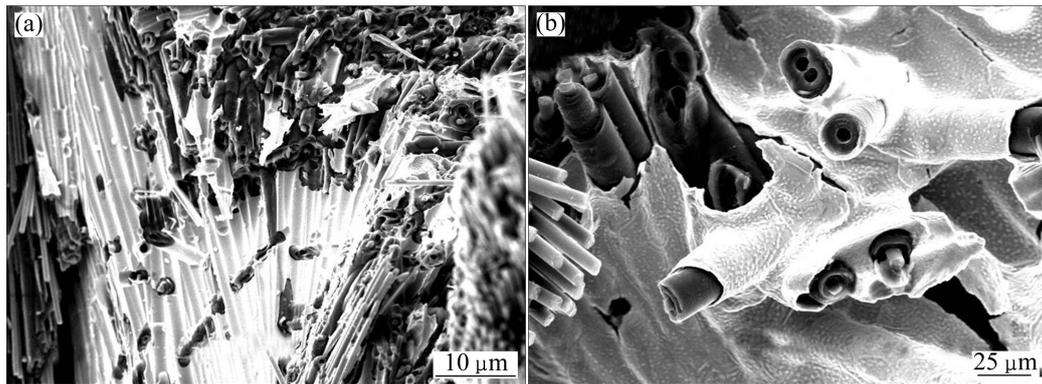


图 5 不同坯体制备复合材料的冲击断口形貌

Fig.5 Impact fractographs of different samples: (a)A3; (b)A5

逐层断裂时, 其复合材料弯曲断裂时具有“假塑性”断裂的特征。当坯体密度较低时, 熔渗金属的含量较高, 其熔渗金属则呈现较典型的金属塑性断裂的“韧窝状”形貌; 而当坯体密度较高时, 其熔渗基体相则呈现解理“台阶状”的断裂形貌, 反应形成的化合物包覆在纤维及热解炭表面, 呈逐层断裂的特征。而当试样冲击断裂时, 与弯曲断裂方式不同, C/C-Cu 复合材料更

倾向于沿 TiC/熔渗金属(Cu)界面断裂。

2.3 与常用滑动电接触材料的力学性能比较

综上所述, 当坯体密度为 $1.1\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ 时, 熔渗法所制备的 C/C-Cu 复合材料的抗弯强度为 $180\sim 300\text{ MPa}$ 冲击韧性高于 3.5 J/cm^2 , 其力学性能明显优于常用滑动电接触材料(见表 2)的力学性能。常用滑动电接

触材料采用传统方法(粉末冶金法)制备,其组织特征为Cu呈条状或块状的孤立岛状^[17]分布在石墨基体中,如图6所示,Cu对石墨基体的增强和增韧作用未能充分发挥出来。而熔渗法制备的C/C-Cu复合材料中,熔融Cu合金液沿着连通孔隙渗入C/C坯体中,C/C坯体与熔渗Cu均形成连续的网状结构(见图1)。因此,熔渗法制备的复合材料可以充分发挥C/C材料和Cu良好的力学性能,同时,反应形成的TiC可以改善C/Cu的界面结合,因而复合材料具有较高的强度和韧性。从力学性能方面分析,熔渗法制备的C/C-Cu复合材料是一种极具潜力的滑动电接触材料。

表2 常用滑动电接触材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of widely used sliding electrical contact materials

Material	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Hardness, HRF	Flexural strength/ MPa	Impact toughness/ ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)
Domestic sliding material	1.66	41.0	41.0	2.29
Imported sliding material	2.24	84.9	55.1	3.34

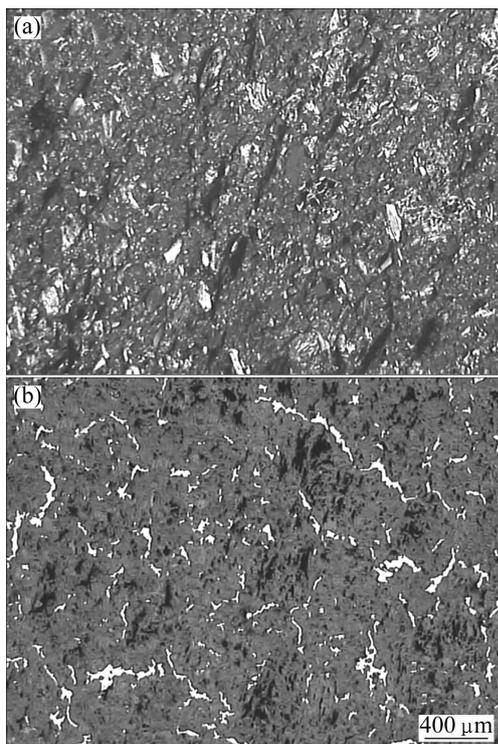


图6 常用滑动电接触材料的金相组织

Fig.6 Optical micrographs of widely used sliding electrical contact materials: (a) Domestic material; (b) Imported material

3 结论

1) C/C-Cu复合材料的力学性能与坯体密度和基体炭类型有关。随着坯体密度的增加,抗弯强度下降,冲击韧性先增加后降低,采用密度为 1.4 g/cm^3 的坯体所制备的复合材料的冲击韧性达到极大值。当坯体密度相同时,用CVI坯体制备的复合材料的强度和韧性明显高于I/C坯体制备的复合材料的。

2) 用CVI坯体制备的复合材料的弯曲曲线呈“假塑性”特征,断裂形式为纤维从热解炭层及熔渗金属相中拔出,熔渗金属相出现典型的“韧窝状”的塑性断裂形貌。用I/C坯体制备的复合材料中,纤维从基体中拔出,呈裸露的形貌。冲击断裂时,C/C-Cu复合材料更倾向于沿TiC/熔渗金属(Cu)界面断裂。

3) C/C-Cu复合材料的强度和韧性均高于常用滑动电接触材料的,此复合材料是一种极具潜力的新型滑动电接触材料。

REFERENCES

- [1] 张晓娟, 孙乐民. 受电弓滑板 and 接触网导线材料的现状及展望[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2006, 27(6): 4-7.
ZHANG Xiao-juan, SUN Le-min. Status and expectation of pantograph slide and contact wire[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 27(6): 4-7.
- [2] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. Tribology International, 1999, 32(7): 367-378.
- [3] AZEVEDO C R F, SINATORA A. Failure analysis of a railway copper contact strip[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(6): 829-841.
- [4] 侯明, 孙乐民, 李爱娜. 电力机车受电弓滑板的现状[J]. 粉末冶金技术, 2006, 24(3): 223-226.
HOU Ming, SUN Le-min, LI Ai-na. Pantograph slide plates for electric locomotive and their recent development[J]. Powder Metallurgy Technology, 2006, 24(3): 223-226.
- [5] QUEIPO P, GRANDA M, SANTAMAR R, MENENOEI R. Preparation of pitch-based carbon-copper composites for electrical applications[J]. Fuel, 2004, 83(11/12): 1625-1634.
- [6] TOBY J, JOHNISON D. Effects of fiber orientation on the tribology of a model carbon-carbon composites[J]. Wear, 2001, 249(8): 647-655.

- [7] DAHAI H, MANORY R. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors[J]. *Wear*, 2001, 249(7): 626–636.
- [8] JANG Y H, KIM S, LEE S, KIM D, UM M. Fabrication of carbon nano-sized fiber reinforced copper composite using liquid infiltration process[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(5): 781–784.
- [9] GUILLET A, NZOMA E Y, PAREIGE P. A new processing technique for copper-graphite multifilamentary nanocomposite wire: Microstructures and electrical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182(1/3): 50–57.
- [10] 胡锐, 李海涛, 薛祥义, 李金山, 寇宏超, 常辉. Ti 对 C/Cu 复合材料界面润湿及浸渗组织的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(5): 840–844.
- HU Rui, LI Hai-tao, XUE Xiang-yi, LI Jin-shan, KOU Hong-chao, CHANG Hui. Effect of Ti on interface wettability and microstructure of C/Cu composite by infiltration[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(5): 840–844.
- [11] EUSTATHOPOULOS N. Dynamics of wetting in reactive metal/ceramic systems[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(7): 2319–2327.
- [12] OKU T, OKU T. Effects of titanium addition on the microstructure of carbon/copper composite materials[J]. *Solid State Communications*, 2007, 141(3): 132–135.
- [13] 冉丽萍, 易茂中, 王朝胜, 杨琳, 易振华. C/C-Cu 复合材料的组织和摩擦磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(4): 530–535.
- RAN Li-ping, YI Mao-zhong, WANG Chao-sheng, YANG Lin, YI Zhen-hua. Friction and wear behavior of C/C-Cu composites fabricated by infiltrating molten Cu into C/C performs[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(4): 530–535.
- [14] 韩杰才, 黄玉东, 赫晓东, 杜善义. 多向细编碳/碳复合材料界面力学性能测试与表征[J]. *复合材料学报*, 1995, 12(4): 72–78.
- HAN Jie-cai, HUANG Yu-dong, HE Xiao-dong, DU Shan-yi. Characteristics of interfaces in 3D fine weave carbon/carbon composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1995, 12(4): 72–78.
- [15] 虞红燕, 石小磊, 许富民, 谭毅. 浸渗铜, 铝对炭/炭复合材料弯曲性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2007, 31(11): 61–64.
- YU Hong-yan, SHI Xiao-lei, XU Fu-min, TAN Yi. Effect of infiltration copper or aluminium on flexural strength of C/C composite materials[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2007, 31(11): 61–64.
- [16] BLANCO C, CASAL E, GRANDA M, MENENDEZ R. Influence of fibre-matrix interface on the fracture behaviour of carbon-carbon composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2003, 23(15): 2857–2866.
- [17] 高强, 吴渝英, 翟宁, 洪钊. 铜石墨材料导电性能研究[J]. *机械工程材料*, 2002, 26(9): 33–37.
- GAO Qiang, WU Yu-ying, ZHAI Ning, HONG Qin. Conductance research of copper-graphite material[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2002, 26(9): 34–36.

(编辑 陈卫萍)